

## КРАТНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Кратные звезды — достаточно распространенные и интересные для исследователей объекты. Общее происхождение компонентов, иерархическая или неиерархическая структура, разнообразие возможных наблюдательных проявлений входящих в кратные системы звездных пар позволяют делать важные выводы как об отдельных объектах, так и о свойствах звездных ансамблей, в состав которых они входят. В частности, изучение звездной кратности приводит к лучшему пониманию процесса образования звезд. Активные исследования кратности звезд в ансамблях, находящихся на разных стадиях эволюции, а также детальное изучение кратных систем в локальной окрестности Солнца, позволили в последние годы существенно продвинуться в понимании фундаментальных закономерностей, связанных с феноменом звездной кратности. Однако есть ряд важных проблем, которые все еще остаются нерешенными.

Multiple stars are rather numerous and interesting for the investigators. Common origin of the components, hierarchical or non-hierarchical structure, variety of possible observational exhibitions of the pairs forming multiple systems lead to important results concerning selected objects as well as the joint characteristics of stellar populations they belong to. In particular, investigation of stellar multiplicity in populations on different stages of stellar evolution, along with detailed investigation of the multiple stars in solar vicinity, in recent years lead to significant advances in understanding of fundamental relations of stellar multiplicity. However, a number of important issues still require solution.

## Введение

Существование кратных звезд было обнаружено вскоре после зарождения наблюдательной астрономии, в XVII столетии. Койпер [1] был первым, кто отметил, что частота встречаемости кратных звезд

и их распределение по физическим характеристикам может оказаться очень важным для развития теории образования звезд. Физические процессы, участвующие в жизни звездных популяций, в частности, динамические взаимодействия, также влияют на это распределение. Таким образом, характеристики кратных систем и их связь с массой главного компонента и с параметрами окружающей среды могут служить для исследования процессов образования и эволюции звездных систем. Кратные звезды позволяют получать уникальную информацию, — отношение периодов пар в одной системе, относительная ориентация плоскостей орбит, распределение компонентов по массам, — важную для определения параметров процесса звездообразования. Кроме того, такие звезды, благодаря комбинации различных способов наблюдения, достаточно часто позволяют надежно определять физические характеристики компонентов, в том числе их массы и светимости, что важно для проверки моделей звездной эволюции.

## **Что такое кратные звезды.**

### **Кратность иерархическая и неиерархическая**

Несмотря на интуитивную понятность термина, дать строгое определение — какие объекты являются кратными звездами, а какие нет — оказывается не вполне простой задачей. Формальный подход позволяет называть так любую группу звезд количеством больше двух, одновременно наблюдавшуюся на небесной сфере и внесенную в каталог или публикацию под одним номером или идентификатором. Множество подобных «формально-кратных» звезд можно встретить в каталоге WDS (Washington Double Stars) [2]. Такой подход легко критиковать, очевидно, что он игнорирует физическую природу объектов и создает множество ложных кратных систем, потенциально объединяя удаленные друг от друга в пространстве звезды (оптические компоненты) и, возможно, теряя настоящие связанные друг с другом компоненты.

Другая возможность — называть кратными все звездные системы (объединенные общим положением в пространстве и, возможно, общим собственным движением группы звезд) с количеством компонентов больше двух. Иногда обозначают также верхнюю границу количества компонентов, например, 10, утверждая, что систему с большим количеством компонентов следует называть мини-скоплением. Однако выбор числа компонентов для верхней границы здесь вполне

произволен, и в любом случае 10 представляется сильно заниженной оценкой — см. обсуждение далее. Возможно также рассматривать как ограничитель размера кратной системы не количество компонентов, а расстояние между ними. В целом такой подход выглядит статистически обоснованным. Современные исследования, однако, показывают, что даже для двойных звезд предельное возможное расстояние между компонентами не определяется однозначно, но зависит от окружающих условий. Это означает, что в отдельных случаях формальное применение пространственного критерия для разделения кратная звезда/скопление может привести к ошибочным результатам. Кроме того, такой критерий чувствителен к точности определения расстояния до системы.

Еще один вариант — называть кратными только физически связанные звездные системы, в которых наблюдается движение компонентов вокруг центра (центров) масс, подобное кеплеровскому. Такой критерий тесно связан с точностью астрометрических наблюдений, а не только с физической природой систем.

Наконец, видимо наиболее строгий из возможных подходов, — рассматривать только устойчивые, иерархические кратные системы (такие, в которых расстояния между соседними парами компонентов отличаются как минимум приблизительно на порядок, и движения по орбитам происходят вокруг центров масс пар), исключая относительно короткоживущие трапецевидные системы, в которых расстояния между по крайней мере тремя соседними компонентами различаются меньше чем в три раза.

Тот или иной подход к определению кратных звезд наиболее разумно выбирать в зависимости от целей исследования.

## Способы наблюдения кратных звезд

Как правило, кратные звезды обнаруживают и наблюдают в рамках тех же программ и задач, что и двойные звезды. В связи с этим, количество способов наблюдений звезд, входящих в кратные системы, достаточно велико и разнородно. Разнороден, в зависимости от способа наблюдения (наблюдательного типа), и набор получаемых данных. Как правило, кратную систему наблюдают как набор пар (составляющими пары в каждом случае могут быть как отдельные светила — компоненты, так и другие пары).

Визуальные пары — те, в которых оба компонента видны и разрешаются оптически при наблюдениях при помощи телескопа. Для

таких пар определяется взаимное расположение компонентов (позиционный угол) и угловое расстояние между ними. Для таких пар возможны только очень приблизительные оценки абсолютных и физических параметров, однако ситуация улучшается, если для них известно расстояние (тригонометрический параллакс), а также сделано несколько позиционных наблюдений. Те визуальные пары, у которых орбитальное движение наблюдается достаточно хорошо, чтобы можно было вычислить параметры орбиты, называют орбитальными. Если для системы, содержащей орбитальную пару, известен тригонометрический параллакс, можно определить сумму масс компонентов такой пары. Интерферометрические пары разрешаются на компоненты при помощи интерферометрических способов наблюдения и, как правило, позволяют определить лишь угловое расстояние между компонентами. Компоненты пар с общим собственным движением, как предполагается, объединены общим происхождением (и, таким образом, как и все физически связанные пары, имеют одинаковое содержание химических элементов и возраст). Пары с общим собственным движением могут стать орбитальными при повышении точности или удлинении периода наблюдений. Астрометрические пары, содержащие невидимый компонент, также позволяют вычисление некоторых параметров орбиты. Характеристики спектроскопических пар (в частности, функция масс и отношение масс компонентов), определяются по движениям линий в совокупном спектре тесной пары, а для затменных — по изменениям кривой блеска. Только для затменных и орбитальных пар возможно определение угла наклона орбиты, что, например, в комбинации с наблюдениями пары как спектрально-двойной, приводит к определению масс компонентов. В кратной системе, представляющей собой комбинацию пар нескольких наблюдательных типов, можно определить больше параметров компонентов и пар, чем в парах по отдельности. Так, сумма масс тесной пары может быть определена с помощью наблюдений широкой пары более высокого иерархического уровня, составляющей которой является тесная пара. Возможны и иные интересные комбинации методов определения параметров.

## **Проблема максимально возможной иерархической кратности**

Теоретически предельную возможную степень иерархической кратности звездных систем можно оценить из следующих соображе-

ний. Система динамически стабильна, если (для круговых орбит) период орбиты внешнего уровня превышает период орбиты внутреннего уровня по крайней мере в пять раз (отношение больших полуосей больше трех). Для эксцентричных орбит этот фактор существенно повышается до 70, отношение больших полуосей — до 20. Количество уровней иерархии, с другой стороны, ограничено приливным взаимодействием с гравитационным полем Галактики, возмущениями от случайных сближений со звездами и гигантскими молекулярными облаками. Было показано [3], что число уровней иерархии не может превышать восемь или девять, в зависимости от параметров орбит компонентов. В предположении максимальной заселенности каждого иерархического уровня, это привело бы к иерархической кратной системе, содержащей 256 или даже 512 компонентов.

На практике, однако, не удастся наблюдать ни подобного количества уровней иерархии (достоверно известны системы с тремя, возможно — четырьмя иерархическими уровнями, но не более), ни полной заселенности наблюдательных уровней. Максимальная достоверно известная иерархическая кратность системы — семь.

Для изменения ситуации можно обратиться не к рассмотрению уже известных иерархических систем, а исследовать неиерархические кратные системы, которые, однако, могут содержать иерархические подсистемы. Наиболее полный каталог визуальных двойных и кратных звезд, WDS, содержит системы с формальной кратностью, превышающей 30, и свыше 500 систем с формальной степенью кратности от шести и выше. Если изучить этот набор формально-кратных звезд, удалив из рассмотрения оптические компоненты (для этого существует ряд приемов, включающих учет параллаксов и собственных движений компонентов, а также статистические соображения), и выделить заведомо иерархические тесные пары и подсистемы путем сопоставления сведений с данными каталогов затменных, орбитальных, спектроскопических двойных звезд, возможно, удастся обнаружить новые иерархические системы высокой кратности [4].

## **Статистическое изучение характеристик ансамбля кратных звезд**

Ансамбль кратных звезд сложен для изучения общих статистических характеристик из-за многочисленных и трудноучитываемых эффектов селекции, влияющих на возможность обнаружения кратной звезды, еще более сложных, чем эффекты селекции для двой-

ных. Как правило, исследователи выбирают один из двух путей. Можно изучить выборку кратных звезд поля в некотором ограниченном объеме, если есть основания считать такую выборку полной. Второй путь — использование различных наблюдательных техник для подробного изучения ограниченных в пространстве однородных звездных ансамблей, содержащих кратные звезды, таких как рассеянные скопления, молодые звездные ассоциации, и пр. Исследования по обоим этим направлениям существенно активизировались в последние годы в связи с существенным повышением качества наблюдений, в том числе, слабых и тесных компонентов.

Важные современные исследования кратных звезд в ограниченном объеме в окрестности Солнца описаны в [5–7]. Содержательный обзор исследований звездной кратности в различных ансамблях содержится в [8].

### **Некоторые результаты**

Современные исследования общих характеристик кратности позволяют выявить следующие тенденции.

- Частота встречаемости и основные характеристики кратных звезд плавно зависят от массы главного компонента, что указывает на единый механизм образования.
- Свойства кратных звезд определяются в основном на pre-MS стадии. Последующая динамическая эволюция систем незначительна.
- Характеристики кратных звезд не поддерживают теорию независимого образования компонентов (random pairing).
- Существует отчетливый разрыв в характеристиках между звездными и планетными системами, вероятно, связанное с различием механизмов их образования.

### **Нерешенные вопросы**

- Являются ли свойства кратности, связанные с звездообразованием, универсальными, или они зависят от условий? Ответ зависит от исследований кратности в различных ансамблях звезд до главной последовательности.
- Действительно ли существуют отклонения от гладкого распределения характеристик кратности от массивных к маломассивным звездам (такие как аномально высокая доля вторичных

- компонентов с отношением масс меньше 0.1, или существование выделенной популяции пар с «близнецовыми компонентами», или они — следствие проявлений эффектов селекции?
- Каковы механизмы образования для тесных пар? Отличаются ли они от процессов и закономерностей образования широких пар?
  - Зависит ли расположение «пустыни коричневых карликов» в пространстве параметров от массы главного компонента, или расстояния между компонентами? Какие физические процессы связаны с ее возникновением?
  - Мешает или способствует кратность звезд образованию планет? Как это зависит от разделения между компонентами, отношения масс, характеристик орбиты?

## Заключение

Исследования кратных звезд — интересный способ тестирования моделей звездообразования и получения информации об отдельных объектах. Можно ожидать, что данные астрометрической миссии Gaia существенно продвинут исследования кратных звезд, обеспечив высокоточную информацию о тригонометрических параллаксах и собственных движениях большой выборки.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16–07–01162, 15–02–04053, а также Программы поддержки ведущих научных школ НШ–9576.2016.2.

## Библиографические ссылки

1. *Kuiper G. P.* Problems of Double-Star Astronomy. I // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1935. — Vol. 47. — P. 15.
2. *Mason B. D., Wycoff G. L., Hartkopf W. I. et al.* VizieR Online Data Catalog: The Washington Visual Double Star Catalog (Mason+ 2001–2014) // VizieR Online Data Catalog. — 2016. — Vol. 1.
3. *Surdin V.* Hierarchical Star Clusters: Fractal Properties and Maximum Population // Dynamics of Star Clusters and the Milky Way / ed. by S. Deiters, B. Fuchs, A. Just et al. : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2001. — Vol. 228. — P. 568.

4. *Gebrehiwot Y.M., Kovaleva D., Kniazev A.Yu. et al.* On utmost multiplicity of hierarchical stellar systems // *Baltic Astronomy*. — 2016. — Vol. 25. — P. accepted.
5. *Raghavan D., McAlister H. A., Henry T. J. et al.* A Survey of Stellar Families: Multiplicity of Solar-type Stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2010. — Vol. 190. — P. 1–42.
6. *Tokovinin A.* From Binaries to Multiples. I. Data on F and G Dwarfs within 67 pc of the Sun // *Astron. J.* — 2014. — Vol. 147. — P. 86.
7. *Tokovinin A.* From Binaries to Multiples. II. Hierarchical Multiplicity of F and G Dwarfs // *Astron. J.* — 2014. — Vol. 147. — P. 87.
8. *Duchêne G., Kraus A.* Stellar Multiplicity // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 51. — P. 269–310.